

幾何学的な整合性の追及に基づく呈示者視野の復元と姿勢の模倣

吉川雄一郎 (大阪大) 浅田稔 (大阪大) 細田耕 (大阪大)

Demonstrator's View Recovery and Posture Imitation Conflict Resolution with Epipolar Geometry

*Yuichiro Yoshikawa (Osaka University), Minoru ASADA (Osaka University),
and Koh HOSODA (Osaka University)

Abstract—This paper presents a computational model of view-based imitation learning without any internal model of the demonstrator. Instead, based on opt-geometric constraint (stereo epipolar constraint), the robot learns to imitate the demonstrator's motion by applying adaptive visual servoing that minimizes the residual between the recovered demonstrator's body parts supposed to be viewed by the demonstrator and the learner's ones in the learner's stereo image planes, and then reproducing the recovered demonstrator's trajectories without any reconstruction of 3-D trajectories. To show the validity, real experiments are shown.

Key Words: imitation learning, epipolar geometry, adaptive visual servoing

1. Introduction

ロボットにおける模倣学習の研究は、多自由度の行動学習を加速する手段として¹⁾、またヒト知能の構造的なモデル化の研究題材として²⁾、近年注目を集めている。従来研究では、行動の呈示者視点の情報(関節角や呈示者視点の軌道)が得られると仮定し、それをいかに習熟あるいは内在化するか、という問題に焦点を当てたものが多い。それらでは呈示者視点の情報を得るため、高精度な3次元観察³⁾や明示的な座標変換⁴⁾などが行なわれていた。しかし、自律的なヒューマノイドロボットを考えると、高精度な3次元観察の実装や座標変換を事前に規定することは困難であり、ロボット自身がセンサ情報に基づいて呈示者視点の情報を獲得するしくみを考える必要がある。

呈示者視点の情報の復元を扱ったものとして、呈示者観察画像と自分自身の観察画像間のエピポラ幾何を利用した手法がある⁵⁾。この手法では、呈示者ロボットと学習者ロボットの身体構造が相似、また初期姿勢が同じであるという仮定の下で、推定されるエピポラ幾何を利用して呈示者視点の画像を復元し、再現の目標軌道を得るものであった。しかし一般的には初期姿勢は異なる場合がほとんどである。そこで本論文ではこの手法を拡張し、姿勢の異なる呈示者の運動を模倣するための呈示者視野復元の手法を提案する。

2. エピポラ幾何に基づく呈示者視野復元

呈示者と学習者の身体構造とカメラパラメータが同じであると仮定すると、呈示者の視野 $([L_D], [R_D])$ で捉えられる呈示自身の運動の軌道は、学習者が正確に呈示運動を再現したときに自身を観察する視野 $[L], [R]$ (再現視野) で捉える運動の軌道と等しいとみなすことができる。従って、 $[L_D], [R_D]$ を復元することができれば、これを目標軌道として呈示運動を再現することが可能である⁵⁾。

2つの視野 $[v], [v']$ があるとき、一般に両視野上の

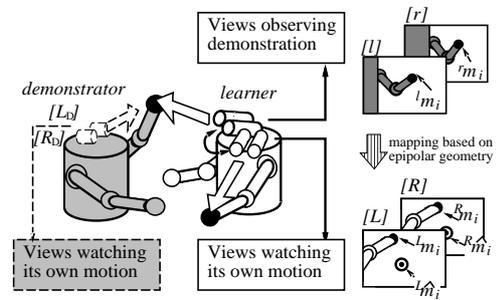


Fig.1 The learner's view at observing $([l], [r])$ and imitating $([L], [R])$, and the demonstrator's view $([L_D], [R_D])$ at watching its self.

対応点の座標 v_m, v'_m は、エピポラ方程式

$$v_m^T v v' F v'_m = 0, \quad (1)$$

を満たす。ここで、 $v v' F$ は基礎行列であり両視野の相対的な位置姿勢およびカメラの内部パラメータによって決まる。

呈示者を観察する視野 $[l], [r]$ (観察視野) と再現視野 $[L], [R]$ のそれぞれの間の正確な基礎行列および ${}^l m, {}^r m$ が既知であるとするとき、 $([l], [L]), ([r], [L]), ([l], [R]), ([r], [R]), ([L], [R])$ に成り立つ5本のエピポラ方程式を解くことによって、 $[L], [R]$ 上の未知の対応点の座標 ${}^L m, {}^R m$ を知る、すなわち $[l], [r]$ 上の点を $[L], [R]$ 上に復元することができる。

呈示者と学習者の姿勢が同じであるとするとき、これらの基礎行列は線形解法によって推定可能である。

3. エピポラ幾何に対する矛盾の解消

呈示者と学習者の姿勢が異なるとき、線形解法では観察視野と再現視野の間の正確な基礎行列を推定することは不可能であるため、前章で示した手法により視野復元を行なおうとすると、復元された点是对応すべき

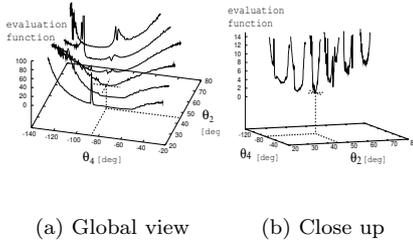


Fig.2 The overview of evaluation function.

点から離れてしまう．すなわち異なる姿勢に対して推定された基礎行列は真のエピポラ幾何に対して矛盾を持つといえ，この矛盾がゼロであるとき，真の基礎行列が推定される．そこで，この写像のずれの自乗平均，

$$E = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (L\mathbf{m}_i - L\hat{\mathbf{m}}_i)^T (L\mathbf{m}_i - L\hat{\mathbf{m}}_i) + (R\mathbf{m}_i - R\hat{\mathbf{m}}_i)^T (R\mathbf{m}_i - R\hat{\mathbf{m}}_i) \quad (2)$$

を評価関数として最小化することで，真のエピポラ幾何に矛盾しない基礎行列を獲得することを考える．

4. 評価関数の最小化

式 (2) の評価関数は，学習者姿勢と呈示者の姿勢とのずれが微小であるとき，代数的な変形と微小項の無視によって，

$$E = \delta\theta^T Q \delta\theta, \quad (3)$$

と表すことができる．ここで $Q \in \mathcal{R}^{m \times m}$ は通常正定行列とみなすことができる．

従って，関節角を変数とする単純な勾配法によって，評価関数の最小化と同時に学習者の姿勢を呈示者と一致させることが可能であることが期待される．そこで，評価関数の勾配方向を適応型ビジュアルサーボ系⁶⁾の手法を応用し，評価関数 E の関節角 θ についてのヤコビ行列 \hat{J}_E をオンライン推定しながら，制御則，

$$\mathbf{u}_{input} = -K \hat{J}_E E \quad (4)$$

でもって最小化を行なう．ただし， $K \in \mathcal{R}^{m \times m}$ 正定ゲイン行列である．

5. Experiments

同じ構造の 2 体のマニピュレータを呈示者と学習者の身体とみなし，学習者の視覚としてステレオカメラを用い，手法の妥当性を示す実験を行なった．

5.1 評価関数の振る舞い

関節角 (θ) を適当に振らせて評価関数をプロットした (see Fig.2)．式 (3) に示すように，評価関数が下に凸の関数とほぼみなせることがわかる．

5.2 評価関数の最小化制御

式 (4) の制御即に従い，評価関数の最小化を行なった．Fig. 3 はそのときの関節角と評価関数の遷移を示してある．この制御によって，呈示者と同じ姿勢 (左図:点線) に，また評価関数がゼロ (右図) に漸近できていることがわかる．

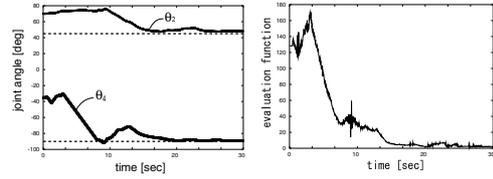


Fig.3 The transition of parameters during minimizing control.

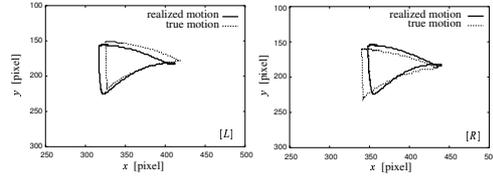


Fig.4 The trajectories of imitated motion (solid lines) and those (broken lines) of desired in the learner's view.

5.3 呈示運動の再現

最小化制御によって獲得された基礎行列を用いて，呈示運動の再現を実際に行なわせた (see Fig. 4)．正解の軌道とほぼ同じ軌道が再現できていることから，十分な精度が得られていることがわかる．

6. おわりに

本論文ではロボットにおける模倣のための，エピポラ幾何に基づく視野変換手法⁵⁾を拡張し，呈示者姿勢の事前教示の代わりに，視野変換のエピポラ幾何に対する矛盾の最小化による，視野変換獲得の手法を提案し，実機を用いた実験によりその妥当性を示した．

本手法では，視野変換は視点が変わる度に再び獲得されなければならない．獲得した視野変換の内在化，また同時に再現運動の習熟および内在化が今後の課題となる．

参考文献

- 1) S. Schaal: Is imitation learning the route to humanoid robots?, Trends in Cognitive Science, 1999.
- 2) M. Asada, K. F. MacDorman, H. Ishiguro, and Y. Kuniyoshi: Cognitive developmental robotics as a new paradigm for design of humanoid robots, In Proc. of the 1st IEEE-RSA Int. Conf. on Humanoid Robots (2000).
- 3) 戸嶋巖樹, 稲邑哲也, 中村仁彦: 力学的身体性を用いたミメシスの閉ループ化, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '01 講演論文集
- 4) 宮本 弘之, 川人 光男: 作業レベルロボット学習のための見まねによる教示, 電子情報通信学会論文誌, J81-D-II, 10, p. 2401 (1988).
- 5) 吉川雄一郎, 浅田稔: 3次元再構成を伴わない観察による他者行動の模倣, 第5回ロボティクスシンポジウム予稿集, p. 158 (2000).
- 6) 細田耕, 浅田稔: 構造やパラメータに関する先見的な知識を必要としないフィードフォワード補償器を持つ適応型ビジュアルサーボ系の構成. 日本ロボット学会誌, 14, 2, p. 313 (1996).